

УДК 622.807:504.06

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.129>© А.В. Павличенко¹, Ю.В. Бучавий¹, А.С. Халак¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ БУРО-ВИБУХОВИХ РОБІТ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ

© A. Pavlychenko¹, Y. Buchavyi¹, A. Khalak¹¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

FORECASTING OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION RATES FROM DRILLING AND BLASTING OPERATIONS ON IRON MINING QUARRIES

Мета. Розробка методики моделювання процесів розсіювання та осідання пилогазової хмари від масових вибухів на залізрудних кар'єрах.

Методика дослідження базується на обґрунтуванні вибору удосконаленої моделі атмосферної дифузії пилогазової хмари від буровибухових робіт на залізрудних кар'єрах для прогнозування рівня забрудненості атмосферного повітря на прилеглих до кар'єру територіях. В роботі використовуються синтез-метод дослідження при аналізі літературних джерел з пошуку адекватної моделі та математичне моделювання із використанням програмного забезпечення для прогнозування рівнів забруднення атмосферного повітря від поширення пилогазової хмари.

Результати дослідження. Оцінено потенційну екологічну небезпеку та масштаби розповсюдження пилогазової хмари від буровибухових робіт на залізрудних кар'єрах. Обґрунтована доцільність використання нестационарної тривимірної моделі перенесення і осідання вагомої домішки (пилу), що враховує дисперсний склад пилу, висоту підйому пилогазової хмари в момент її формування, а також швидкість осідання частинок пилу в залежності від їх ваги. Проведено моделювання процесів формування та дифузії-переносу пилогазової хмари від буровибухових робіт на кар'єрі за певних метеорологічних умов та прогнозування рівнів забруднення атмосферного повітря на прилеглих територіях.

Наукова новизна. Полягає у виявленні характеру осідання на земну поверхню часток пилу різної фракції по мірі перенесення і розсіювання пилогазової хмари від буровибухових робіт.

Практичне значення. Запропонована модель дозволить прогнозувати параметри перенесення і розсіювання пилогазової хмари, обчислювати концентрації пилу на прилеглих до кар'єру територіях, а також обґрунтовано вибирати найбільш ефективні схеми локалізації пилогазової хмари для конкретних технологічних і кліматичних умов.

Ключові слова: буровибухові роботи, пилогазова хмара, залізрудні кар'єри, забруднення атмосфери, моделювання атмосферної дисперсії.

Вступ. На теперішній час руйнування міцних гірських порід у великих обсягах може здійснюватися лише із застосуванням буровибухових робіт. При видобутку корисних копалин відкритим способом буровибухові роботи є найбільш небезпечним і шкідливим для навколишнього середовища технологічним

процесом [1-3]. Кожен масовий вибух на кар'єрі супроводжується залповим викидом в атмосферу значних обсягів пилу і шкідливих газів [3-7].

Пилогазова хмара в результаті перенесення, розсіювання і осідання, забруднює ґрунти, поверхневі води і атмосферне повітря в радіусі до 10-15 км від кар'єру. Концентрація пилу в повітрі при цьому може досягати 1200-1800 ГДК на відстані до 1 км і до 90 ГДК на відстані до 10 км від кар'єру [5-9].

Величина залпового викиду після масового вибуху значно перевершує викиди від інших джерел забруднення кар'єру. Проте пилогазова хмара, що утворюється при цьому розсіюється в атмосфері впродовж 10-15 хв. При цьому основна маса пилу осідає на відстані, приблизно до 1,5 км від епіцентру вибуху, тобто осідає як в межах санітарно-захисної зони (СЗЗ) кар'єра, так і частково за її межами, на території житлової забудови тощо. Таке забруднення повітря сприяє погіршенню стану навколишнього середовища і загрожує здоров'ю населення, яке проживає на прилеглих територіях. Особливу небезпеку представляє фракція пилу 2,5-10 мкм, що за несприятливих метеорологічних умов може переноситися на відстань до 10 км від епіцентру вибуху [6-10].

Зазвичай приземні концентрації забруднюючих речовин від промислових викидів розраховують за стандартизованою методикою ОНД-86, яка адаптована переважно для організованих джерел забруднення атмосфери, що мають стаціонарну, тобто незмінну за часом інтенсивність викиду. Дана модель не враховує ані фактор часу, ані клас стійкості атмосфери й шорсткості земної поверхні. Натомість внаслідок масового вибуху, усі забруднювальні речовини, що формують пилогазову хмару здійснюються в атмосферу за лічені секунди, а далі пилогазова хмара постійно змінює свою конфігурацію та траєкторію, розсіюється й переноситься вітром залежно від метеорологічних умов та рельєфу місцевості. Таким чином, важливим завданням є моделювання забруднення атмосфери в результаті процесів переносу, розсіювання і осідання пилогазової хмари стосовно конкретної території з властивими їй метеорологічними умовами. Це дозволить виявляти території з найбільш високими значеннями приземних концентрацій пилу, досліджувати на цих територіях її динаміку, а також оцінити ефективність різних заходів з локалізації залпового викиду для конкретних технологічних та погодних умов.

Метою роботи обґрунтування методики з моделювання процесів розсіювання та осідання пилогазової хмари від масових вибухів на залізрудних кар'єрах з урахуванням погодних умов.

Постановка задачі і методика дослідження. Для оцінки забруднення атмосфери розроблено значну кількість математичних моделей [10-15]. Серед них є як прості, двовірні експрес-моделі розсіювання концентрацій за розподілом Гауса, так і складні тривірні моделі переносу-дифузії домішок в приземному шарі, що враховують неоднорідність земної поверхні. Найбільш повні і досконалі моделі вимагають наявності додаткової інформації, яку часто неможливо зібрати або отримати експериментально.

Вибір конкретної моделі обумовлюється вимогами до моделювання, характером оцінок забруднення, специфіки поширення домішок в різних об'єктах довкілля та метеорологічних умовах. В результаті аналізу джерел літератури, була обрана нестационарна тривимірна модель перенесення і осідання вагової домішки (пилу), що враховує дисперсний склад пилу, висоту підйому пилогазової хмари в момент її формування, а також швидкість осідання частинок пилу в залежності від їх ваги [16].

Відповідно до обраної моделі розподіл концентрацій суміші над земною поверхнею після викиду пилу масою M_0 в точці з координатами (X, Y, Z) на певний період часу після вибуху може бути описано формулою:

$$\phi(X, Y, Z, t) := M_0 \cdot \phi_x(X, t) \cdot \phi_y(Y, t) \cdot \phi_z(Z, t) \quad (1)$$

де

$$\phi_x(X, t) := \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_x \cdot t}} \right) e^{-\frac{\left(X - u \cdot \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right) \cdot t \right)^2}{4 \cdot D_x \cdot t}} \quad \phi_y(Y, t) := \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_y \cdot t}} \right) e^{-\frac{\left(Y - u \cdot \cos\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right) \cdot t \right)^2}{4 \cdot D_y \cdot t}}$$

$$\phi_z(Z, t) := \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_z \cdot t}} \right) e^{-\frac{w_1(Z-h)}{2 \cdot D_z}} \cdot \left[e^{-\frac{(Z-h)^2}{4 \cdot D_z \cdot t}} + e^{-\frac{(Z+h)^2}{4 \cdot D_z \cdot t}} - \left(\frac{w_1}{2 \cdot D_z} \right) \cdot \sqrt{\pi \cdot D_z \cdot t} \cdot e^{-\frac{(Z+h)^2}{4 \cdot D_z \cdot t}} \cdot \left[e^{-\frac{\left(Z+h+\left(\frac{w_1}{2 \cdot D_z}\right) \cdot D_z \cdot t \right)^2}{2 \cdot \sqrt{D_z \cdot t}}} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{Z+h+\left(\frac{w_1}{2 \cdot D_z}\right) \cdot D_z \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D_z \cdot t}} \right] \right] \right]$$

, $\Phi(\xi) = e^{\xi^2} \operatorname{erfc}(\xi)$ – інтеграл вірогідності функції розсіювання пилогазової хмари, w_i – швидкість осідання частинок пилу окремої фракції. D_x, D_y, D_z – коефіцієнти дифузії пилогазової хмари в напрямках X, Y, Z ; u – швидкість вітру, що збігається з напрямом осі X ; α – напрямок вітру, ° (за азимутном).

Для різномірного складу пилу, що містить n -фракцій, сумарна концентрація визначається за формулою:

$$\phi_{\Sigma}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n p_i \phi_i(x, y, z, t, w_i) \quad (2)$$

де p_i – частина пилу i -ї фракції (очевидно, що $\sum_{i=1}^n p_i = 1$).

Особливістю даної моделі є можливість визначити масу пилу M_t , яка осіла за період часу t після моменту залпового викиду на поверхні землі в точці з координатами (x, y) за формулою:

$$M_t(x, y, t) = \sum_{i=1}^n w_i p_i \int_0^t \phi_i(x, y, 0, t, w_i) dt \quad (3)$$

тобто,

$$M_t(X, Y, t) := w_1 \cdot p_1 \cdot \int_0^t \phi_1(X, Y, 0, t) dt + w_2 \cdot p_2 \cdot \int_0^t \phi_2(X, Y, 0, t) dt + w_3 \cdot p_3 \cdot \int_0^t \phi_3(X, Y, 0, t) dt$$

Передбачається, що пил не піддається фізико-хімічним перетворенням і швидкість його розпаду дорівнює нулю, також як і швидкість поглинання пилу, поверхнею. Параметри пилогазової хмари залежать від конфігурації блоку, що підривається, типу вибухової речовини, а також міцності, щільності і вологості породи, що підривають (рис. 1).

Основні результати. Зібравши необхідні дані, для визначення кількості пилу потрапила в атмосферу, ми скористалися «Методикою розрахунку шкідливих викидів від буровибухових робіт».

Нижче наведено результати розрахунку з визначення валових та разових викидів забруднювальних речовин при проведенні гірничих робіт відповідно до галузевої методики [17] (табл. 1).

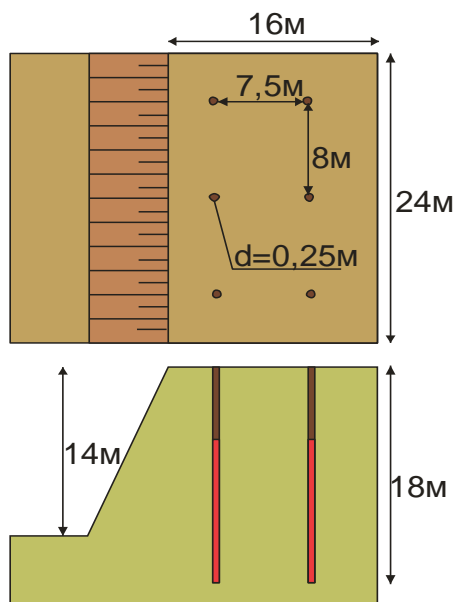


Рис. 1. Параметри блоку, що підривається

Таблиця 1

Результати розрахунку валового викиду забруднювальних речовин при вибуху блоку

Код р-ни	Назва речовини	Максимальний викид, г/с	Валовий викид, т/рік
0301	Азот (IV) оксид	14448,0	0,020047
0337	Вуглецю оксид	50525,0	0,069875
2907	Пил неорганічний >70% SiO ₂	810000,0	0,810000

Розрахункові формули, вихідні дані

Валовий викид шкідливих газів визначається за формулою:

$$M = K \cdot A \cdot (Q_{ngx} + Q_{gm}) \cdot N \cdot 10^{-6} \text{ т/рік}$$

$A=4300$ кг – кількість заряду, вибухової речовини (ВР)

$N=1$ – кількість вибухів в рік.

Вибухова речовина: Грамоніт 79/21, міцність порід: 13–15

Q_{ngx} – питомий вміст шкідливих газів в пилогазовій хмарі (ПГХ) при вибуху 1 кг вибухових речовин;

Q_{gm} – питомий вміст шкідливих газів в відбитої гірничої маси (ГМ)

Значення розрахункових коефіцієнтів і питомий вміст забруднювальних речовин в ПГХ і ГМ для даної міцності порід (табл. 2).

Максимально-разовий викид шкідливих газів визначається за формулою:

$$G = K \cdot A \cdot Q_{\text{гзх}}, \text{ г/с}$$

Валовий викид пилу визначається за формулою:

$$M = Q_n \cdot K_2 \cdot Q_{\text{об}} \cdot N \cdot 10^{-3} \text{ т/рік};$$

$Q_{\text{об}} = 5400 \text{ м}^3$ – обсяг підірваної гірничої маси;

$Q_n = 0,1 \text{ кг/м}^3$ – питоме пиловиділення з 1 м^3 гірської маси;

$K_2 = 1,50$ – коефіцієнт, що враховує вологість матеріалу (вологість: 0,6-1%).

Максимально-разовий викид пилу визначається за формулою:

$$G = Q_n \cdot K_2 \cdot Q_{\text{об}} \cdot 10^3 / t \text{ г/с.}$$

$t = 1 \text{ с}$ – тривалість вибуху.

Таблиця 2

Результати розрахунку викидів газів при вибуху блоку

Речовина	K , г/л	$Q_{\text{гзх}}$, л/кг	$Q_{\text{гм}}$, л/кг
CO	1,25	9,4	3,6
NO ₂	1,40	2,4	0,93

Отримана від вибуху кінетична енергія заносить частки пилу різного діаметру на різні висоти. Була встановлена емпірична залежність висоти підйому частинок пилу в залежності від їх діаметру і щільності, а також дисперсійного складу рудного пилу в пилогазовій хмарі (рис. 2) [5].

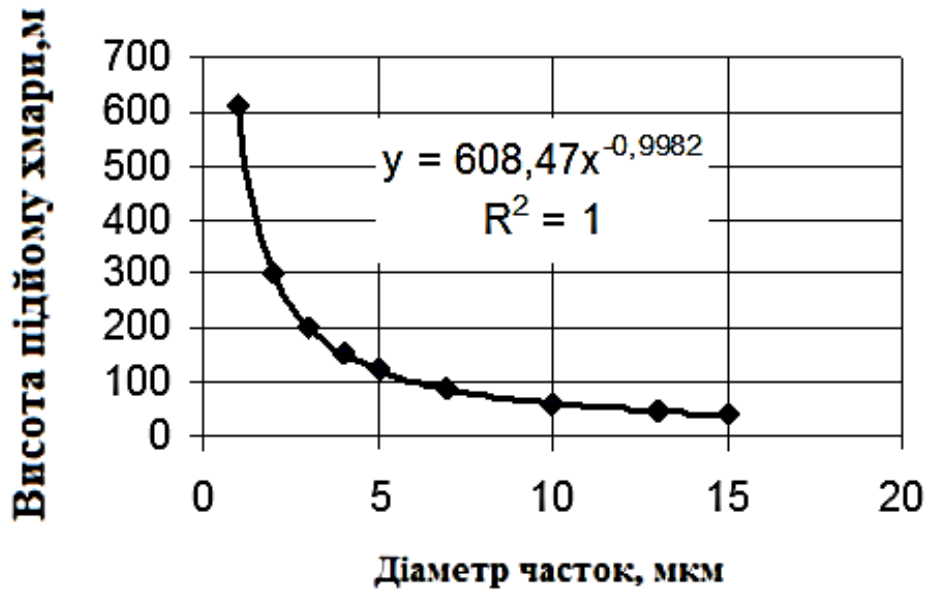


Рис. 2. Залежність висоти підйому частинок пилу в залежності від діаметра

Таким чином, була визначена висота підйому і швидкість осідання пилу дрібної, середньої і великої фракції, з урахуванням глибини кар'єра (рис. 3).

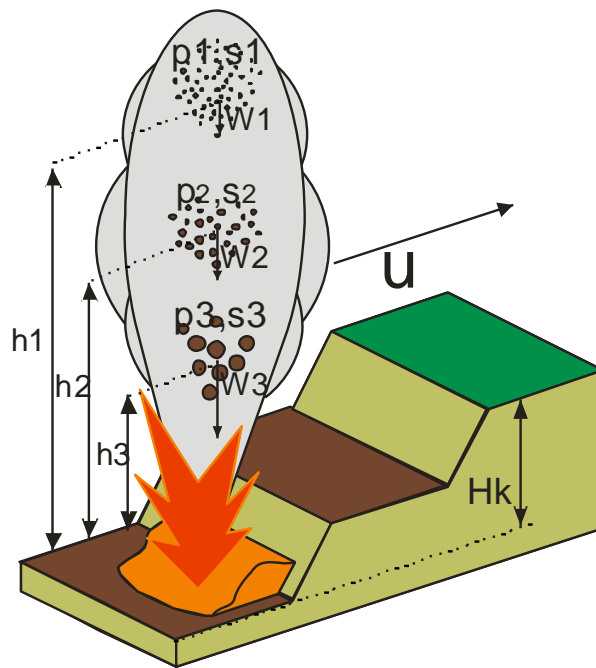


Рис. 3. Схема підйому частинок пилу різних фракцій і швидкості їх осідання

Після утворення пилогазової хмари відбувається процес її розсіювання і перенесення, на який впливають погодні умови і рельєф місцевості (рис. 4).

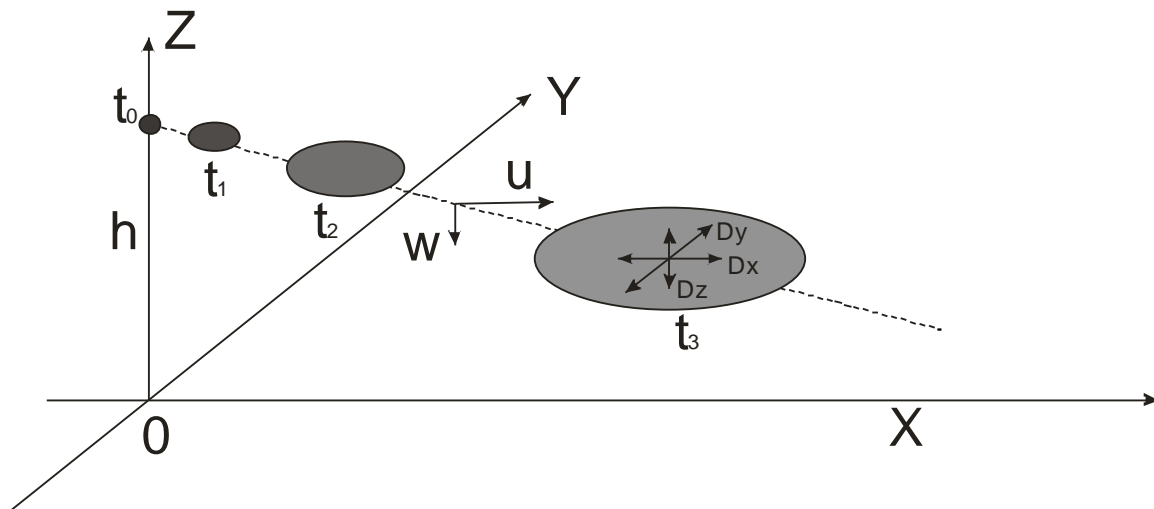


Рис. 4. Схема розсіювання та переносу ПГХ

На основі цих методик і рівняння турбулентної дифузії [17-20], була отримана удосконалена нестационарна тривимірна модель перенесення і осідання газо-пилової суміші, що враховує дисперсний склад пилу, висоту підйому пилогазової хмари в момент її зародження, а також швидкість осідання частинок в залежності від їх щільності і середнього діаметра.

Для додання моделі гнучкості ми оснастили її блоком обчислення допоміжних величин, таких як знаходження щільності і в'язкості повітря в залежності від його тиску та температури, а також розрахунок швидкості осідання частинок пилу різних фракцій за методикою Озейна.

На рис. 5 наведено вихідні дані, що використовувалися для моделювання процесу переносу для умов кар'єрів Криворізького залізорудного басейну.

Вихідні дані для розрахунку параметрів поширення пилогазової хмари, що виникає під час буро-вибухових робіт наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вхідні дані до розрахунку параметрів пилогазової хмари

Параметр	Значення
Температура атмосферного повітря T_c , С	12
Тиск атмосферного повітря P_r , мм. рт. ст.	750
Початкова висота підйому легких частинок ПГХ над поверхнею землі h_1 , м	87
Початкова висота підйому середніх частинок в ПГХ над поверхнею землі h_2 , м	38
Початкова висота підйому важких частинок в ПГХ над поверхнею землі h_3 , м	9
Початкова маса піднятого пилу в хмарі M_0 , мг	810000000
Частка легких частинок в загальній масі пилу, p_1	0,14
Частка середніх частинок в загальній масі пилу, p_2	0,16
Частка важких частинок в загальній масі пилу, p_3	0,70
Середній діаметр частинок дрібної фракції s_1 , м	0,000007
Середній діаметр частинок середньої фракції s_2 , м	0,000016
Середній діаметр частинок крупної фракції s_3 , м	0,000068
Щільність частинок пилу ρ , кг/м ³	4000
Швидкість повітря u , м/с	4
Азимут вітру (типів значення за напрямками: Північ: 0; Північний Схід: 45; Схід: 90; Південний Схід: 135; Південь: 180; Південний Захід: 225; Захід: 270; Північний Захід: 315), α°	135

Вхідні дані були використані для розрахунку додаткових величин, від яких залежить характер поширення пилогазової хмари на території прилеглий до кар'єру. Дані додаткові величини визначались за допомогою програми MathCad 15, листінг якої наведено на рис. 5. Результати розрахунку приземних концентрацій пилу наведено на рис. 6.

Обчислення допоміжних величин:

Визначення щільності і в'язкості атмосферного повітря

Щільність атмосферного повітря в залежності від Т і Р, кг/м	$\rho_A := \frac{P_P \cdot \mu}{R_g \cdot T_K} = 1.22203$
Середня швидкість теплового руху молекул повітря, м/с	$v := \sqrt{\frac{8 \cdot R_g \cdot T_K}{\pi \cdot \mu}} = 456.46822$
Середня довжина вільного пробігу молекул повітря, м	$l_m := \frac{K_b \cdot T_K}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot P_P} = 0.0000000984$
Динамічна в'язкість атмосферного повітря в залежності від Т і Р, Па*с	$\eta := \frac{\rho_A \cdot v \cdot l_m}{3} = 0.0000183$

Розрахунок швидкості осідання частинок пилу різних фракцій (по формулі Озеяна)

Швидкість осідання легких частинок пилу w1, м/с	$w_1 := \frac{\left[\frac{-8}{3} \cdot \eta + \sqrt{\left[\frac{64}{9} \cdot \eta^2 + \frac{8}{27} \cdot \rho_A \cdot (\rho - \rho_A) \cdot g \cdot s_1^3 \right]} \right]}{s_1 \cdot \rho_A} = 0.005831$
Швидкість осідання середніх частинок пилу w2, м/с	$w_2 := \frac{\left[\frac{-8}{3} \cdot \eta + \sqrt{\left[\frac{64}{9} \cdot \eta^2 + \frac{8}{27} \cdot \rho_A \cdot (\rho - \rho_A) \cdot g \cdot s_2^3 \right]} \right]}{s_2 \cdot \rho_A} = 0.030295$
Швидкість осідання важких частинок пилу w3, м/с	$w_3 := \frac{\left[\frac{-8}{3} \cdot \eta + \sqrt{\left[\frac{64}{9} \cdot \eta^2 + \frac{8}{27} \cdot \rho_A \cdot (\rho - \rho_A) \cdot g \cdot s_3^3 \right]} \right]}{s_3 \cdot \rho_A} = 0.408467$

Де:	{	$R_g := 8314.472$	Універсальна газова стала, Дж моль/К	R
		$\mu := 28.96$	Молярна маса атмосферного повітря, кг/моль	μ
		$K_b := 1.3806504 \cdot 10^{-23}$	Постійна Больцмана	K
		$d_0 := 3 \cdot 10^{-10}$	Середній діаметр молекул газів, що утв повітря, м	d1
		$g := 9.807$	Прискорення вільного падіння, м/с ²	g1

Рис. 5. Обчислення додаткових параметрів

За допомогою моделі можна вичислити концентрацію пилу в будь-якій точці місцевості на конкретний період часу, визначити кількість пилу, що осів за певний період і побудувати графіки динаміки концентрації пилу в конкретних точках.

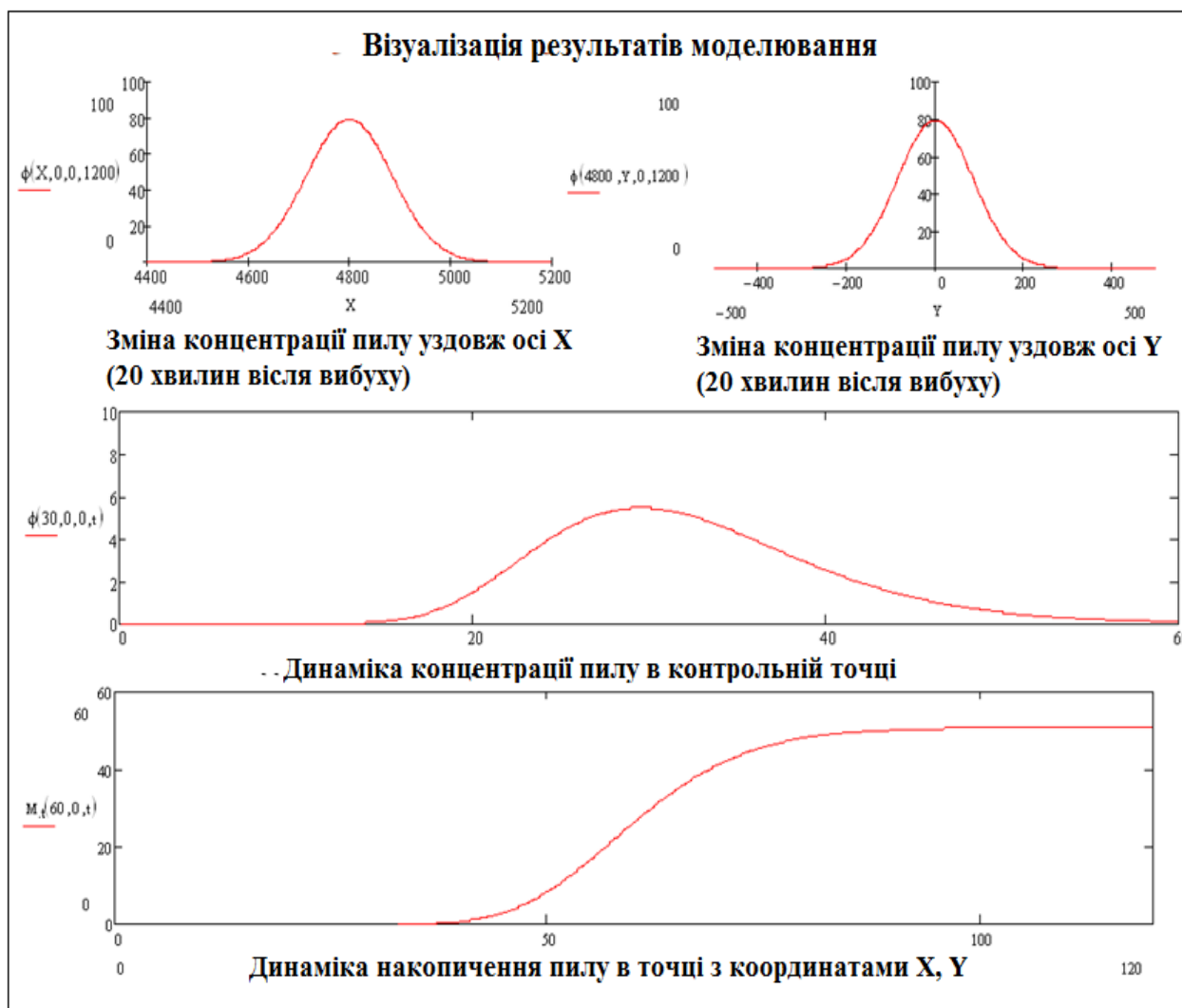


Рис. 6. Приклад розрахунку приземних концентрацій

Для побудови моделі поширення пилогазової хмари також використовувалася програма MathCad 15. На основі її обчислень були сформовані основні електронні таблиці у вигляді матриці розподілу концентрацій в локальній системі координат з кроком 10 м на різні періоди часу (рис. 7). Далі ці результати були перетворені в електронні таблиці формату MS Excel для подальшого використання в інших програмах.

Потім електронні таблиці були експортовані в систему ArcGIS 10.5 у вигляді нового шару концентрацій, що представляють собою сукупність точкових об'єктів.

Далі в програмі ArcGIS 10.5 проводилася побудова ізоліній приземних концентрацій методом растрової інтерполяції.

В системі ArcGIS 10.5 також була виконана обробка аерофотознімку району розміщення гірничодобувного підприємства з подальшою його прив'язкою до шару концентрацій і синхронізації систем координатних проекцій.

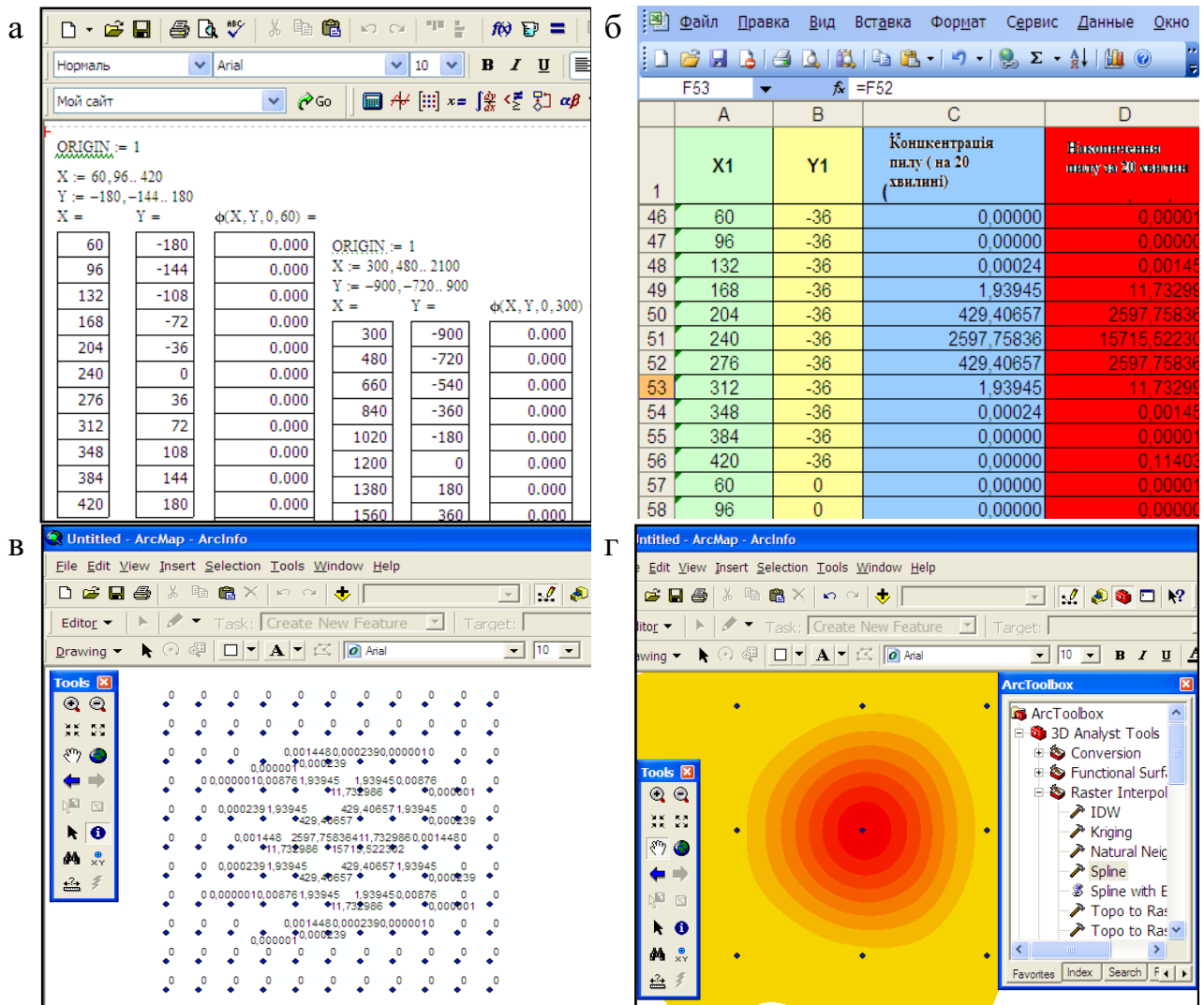


Рис. 7. Основні етапи обчислення приземних концентрацій за допомогою спеціалізованих програм

Накладання шару концентрацій на растрову «карту» місцевості дозволило оцінити розподіл приземних концентрацій і їх динаміки стосовно конкретної території. Дана модель використовувалася для оцінки динаміки значень приземних концентрацій пилу в результаті розсіювання пилогазової хмари на прилеглих до кар'єру територіях, на якому при відпрацюванні верхніх уступів застосовуються буро-вибухові роботи. Візуалізацію результатів моделювання поширення пилогазової хмари наведено на рис. 8.

Як видно з рис. 8 пилогазова хмара поширюється далеко за межі кар'єру та його санітарно-захисну зону, при цьому приземна концентрація пилу перевищує ГДК в десятки разів навіть після 20 хвилин від початку масового вибуху. При цьому визначено, що більша частка важкої фракції пилу (середній діаметр ~68 мкм) не виноситься за межі кар'єру, а осідає на його уступах. Середня фракція

пилу (середній діаметр ~ 16 мкм) осідає переважно на території санітарно-захисної зони кар'єру, при цьому її приземні концентрації зазвичай перевищують ГДК у десятки разів. Дрібна ж фракція пилу (середній діаметр ~ 7 мкм), осідає значно повільніше та розсіюється найбільш ефективно, за рахунок чого розповсюджується далеко за межі санітарно-захисної зони кар'єру. І хоча приземна концентрація пилу дрібної фракції значно менше, вона може становити небезпеку для населення за певних несприятливих метеорологічних умов. У зв'язку з цим виникає необхідність в локалізації пилу саме дрібної фракції при проведенні буровибухових робіт.

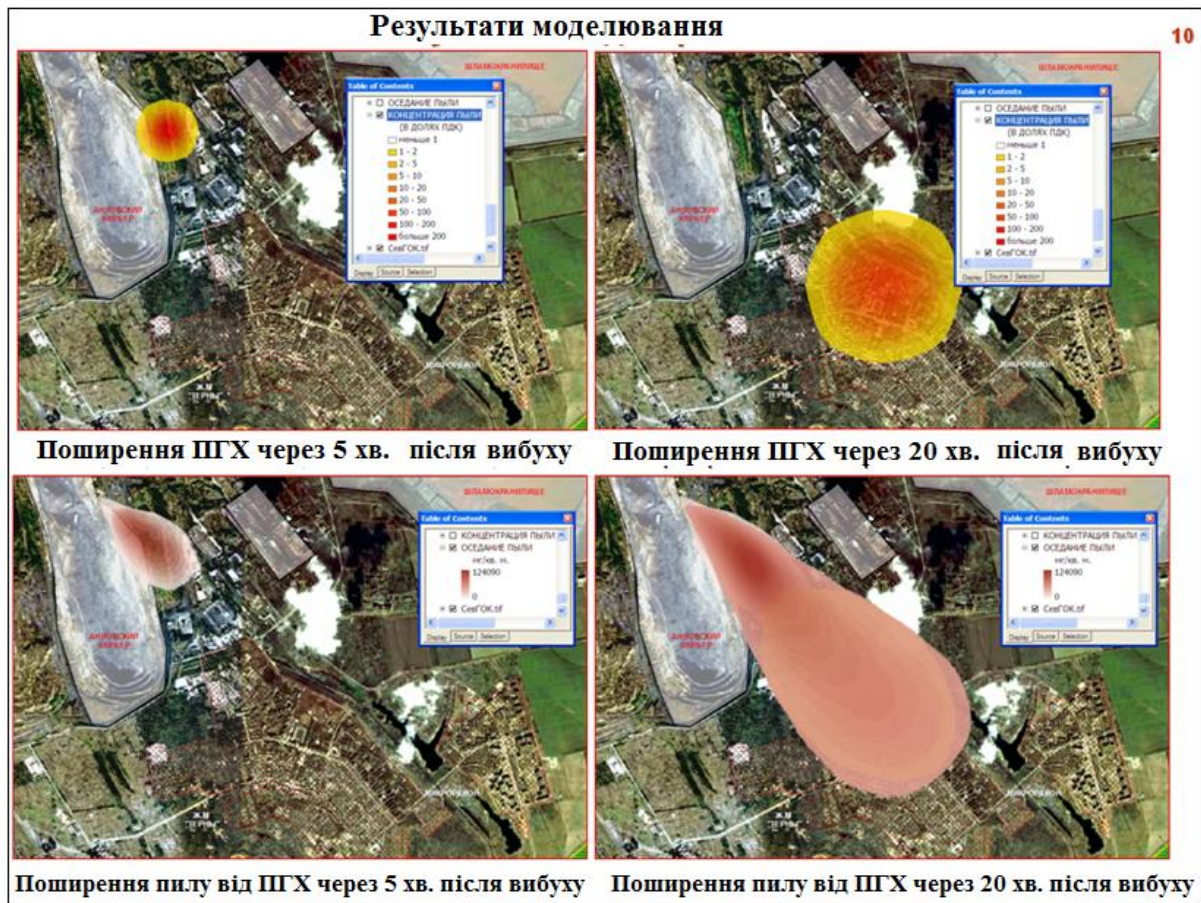


Рис. 8. Результати моделювання поширення пилогазової хмари

Висновки. В результаті виконання роботи була створена методика, яка дозволяє прогнозувати параметри перенесення і розсіювання пилогазової хмари, обчислювати концентрації пилу на прилеглих до кар'єру територіях, а також обґрунтовано вибирати найбільш ефективну схему локалізації пилогазової хмари для конкретних технологічних і погодних умов. На основі ряду галузевих методик і рівняння турбулентної дифузії, була отримана удосконалена нестационарна тривимірна модель перенесення і осідання пилогазової суміші, що враховує дисперсний склад пилу, висоту підйому пилогазової хмари в момент її зародження, а також швидкість осідання частинок в залежності від їх щільності і середнього діаметру.

Перелік посилань

1. Зберовский, А.В. (1997) *Охрана атмосферы в экосистеме «карьер - окружающая среда - человек»*. РИО АП ДКТ.
2. Козловская, Т.Ф., & Чеченко, В.Н. (2010). Пути снижения уровня экологической опасности в районах добычи полезных ископаемых открытым способом. *Вісник КНУ імені Михайла Остроградського*, 6, 163-168.
3. Дриженко А.Ю., Шустов, А.А., Адамчук, А.А., & Никифорова, Н.А. (2017). Совершенствование технологии открытой разработки железорудных карьеров Украины при их углубке. *Зб. наук праць НГУ*, 52, 79-86.
4. Dryzhenko, A., Shustov, O., & Adamchuk, A. (2016). Prospects for future mining of steep ironore deposits in the context of Kryvbas. *Metallurgical and mining industry*, (10), 46-52.
5. Юрченко, А.А. (2010). Физические процессы выброса пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах. *Науковий вісник НГУ*, 2, 85-88.
6. Тверда, О.Я., & Лавриненко, Ю.В. (2016). Оцінка впливу процесу механічного подрібнення гірської маси на навколишнє середовище та стан здоров'я працюючих. *Проблеми охорони праці в Україні*, 31, 128-134.
7. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2017). Ecological and technological aspects of ironore underground mining. *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 59-67.
<https://doi.org/10.15407/mining11.02.059>
8. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Sudakov, A. (2018). Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 29-38.
<http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/3>
9. Хоменко, О.Е., Кононенко, М.Н., Миронова, И.Г., & Юрченко, К.О. (2017). Пути снижения техногенной нагрузки на горнодобывающие регионы Украины. *Збірник наукових праць НГУ*, (51), 77-83.
10. Бучавий, Ю.В., Павличенко, А.В., & Семеріч, К.В. (2013). Алгоритм багатофакторного моделювання процесів забруднення атмосферного повітря на гірничо-збагачувальних комбінатах. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр*, 111, 12-22.
11. Харламова, Е. В., Малеваный, М.С., & Пляцук, Л.Д. (2012). Теоретические основы управления экологической безопасностью техногенно нагруженного региона. *Екологічна безпека*, 1 (13), 9-12.
12. Vambol, V., & Rashkevich, N. (2017). Analysis of methods of identification of ecologically danger substances in atmospheric air. *Техногенно-екологічна безпека*, 2, 73-78.
13. Колесник, В.Є., Павличенко, А.В., & Бучавий, Ю.В. (2018). Уніфікована методика комплексного оцінювання рівня екологічної небезпеки промислових об'єктів та ефективності впровадження природоохоронних технологій. *Техногенно-екологічна безпека*, 3, 64-69.
<http://doi.org/10.5281/zenodo.1182847>
14. Займай, С.С., & Якубайлік, О.Е. (1998). Моделі оцінки і прогнозу забруднення атмосфери промисловими викидами в інформаційно-аналітичній системі природоохоронних служб великого міста. *Краснояр. держ. ун-т*.
15. Колесник, В.Є., Павличенко, А.В., & Холоденко, Т.Ф. (2018). Комплексне оцінювання рівня екологічної небезпеки технологій буропідричних робіт із застосуванням емульсійних вибухових речовин в кар'єрах. *Збірник наукових праць НГУ*, 55, 360-370. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2018_55_38.
16. Бересневич, П.В., Михайлов, В.А., & Філатов, С.С. (1990). *Аерология кар'єрів: Довідник*. Недра.
17. *Отраслевые методические указания по определению количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу при взрывных работах в угольных разрезах* (1984). Минуглепром СССР ВНИИОСуголь.
18. Бітколов, Н.З., & Медведєв, І.І. (1992). *Аерология кар'єрів*, Недра.
19. Матвеев, Л.Т. (1976). *Курс общей метеорологии*. Гидрометеиздат.

20. Колесник, В.Е., Бучавый, Ю.В., & Юрченко, А.А. (2011). Методы оценки экологической опасности выбросов пыли при массовых взрывах в железорудных карьерах. *Науковий вісник НГУ*, 5, 113-120.

АННОТАЦИЯ

Цель. Разработка методики моделирования процессов рассеивания и осаждения пылегазового облака от массовых взрывов на железорудных карьерах.

Методика исследования базируется: на обосновании выбора усовершенствованной модели атмосферной диффузии пылегазового облака от буровзрывных работ на железорудных карьерах для прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха, на прилегающих к карьере территориях. В работе используются синтез-метод исследования при анализе литературных источников по поиску подходящей модели и математическое моделирование с использованием программного обеспечения для прогнозирования уровней загрязнения атмосферного воздуха от распространения пылегазового облака.

Результаты исследования. Оценена потенциальная экологическая опасность и масштабы распространения пылегазового облака от буровзрывных работ на железорудных карьерах. Обоснована целесообразность использования нестационарной трехмерной модели переноса и оседания весомой примеси (пыли), учитывающий дисперсный состав пыли, высоту подъема пылегазового облака в момент ее формирования, а также скорость оседания частиц пыли в зависимости от их веса. Проведено моделирование процессов формирования и диффузии-переноса пылегазового облака от буровзрывных работ на карьере для определенных метеорологических условий и прогнозирования уровней загрязнения атмосферного воздуха на прилегающих территориях.

Научная новизна. Заключается в выявлении характера оседания на земную поверхность частиц пыли различной фракции по мере переноса и рассеивания пылегазового облака от буровзрывных работ.

Практическое значение. Предложенная модель позволит прогнозировать параметры переноса и рассеивания пылегазового облака, вычислять концентрации пыли на прилегающих к карьере территориях, а также обоснованно выбирать наиболее эффективных схемы локализации пылегазового облака для конкретных технологических и климатических условий.

Ключевые слова: буровзрывные работы, пылегазовое облако, железорудные карьеры, загрязнение атмосферы, моделирование атмосферной дисперсии.

ABSTRACT

Goal. Development the methodology of dispersion and precipitation processes modeling of dust and gas cloud caused by mass explosions in iron ore quarries.

Research methodology is based: on the rationale choosing of specified of atmospheric dispersion model of dust and gas cloud caused by drilling and blasting operations at iron ore pits to predict the air pollution rate around the quarry areas. In this work, we use the synthesis research method for analyzing literature to find an appropriate atmospheric dispersion model and mathematical modeling using software to predict the air pollution rate from the spread of a dust and gas cloud.

Research results. The potential environmental hazard and the extent of the dust and gas cloud from drilling and blasting operations on iron ore quarries are estimated. The expediency of using an unsteady three-dimensional model of the transport and sedimentation of significant impurities (dust) is justified, taking into account the dispersed composition of dust, the height of the dust and gas cloud

at the time of its formation, and also the sedimentation rate of dust particles depending on their weight. The modeling of the processes of formation and diffusion-transfer of a dust and gas cloud from blasting operations at a quarry for certain meteorological conditions and predicting the levels of atmospheric air pollution in the adjacent territories was carried out.

Scientific novelty consists in identifying the process of the subsidence of dust particles of various fractions on the earth's surface as the dust and gas clouds transfer and disperse from drilling and blasting.

Practical value. The proposed model will make it possible to predict the displacement and dispersion parameters of a dust and gas cloud, calculate dust concentrations in areas adjacent to a quarry, and also reasonably choose the most effective dust and gas cloud localization schemes for specific technological and climatic conditions.

Keywords: *drilling and blasting operations, dust and gas cloud, iron ore quarries, air pollution, atmospheric dispersion modeling.*